

В. А. ВАНИН, Н. М. КРУГОЛ, А. П. ЛАЗУРЕНКО

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ КОТЛОАГРЕГАТА ТЭС В ЗАДАЧЕ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

В работе рассматриваются математические модели вспомогательных механизмов ТЭС. Используя табличные и графические представления аэрогидродинамических характеристик серийных вентиляторов и насосов, восстановлены аппроксимирующие их математические модели квазистационарного функционирования с помощью метода наименьших квадратов и законов подобия для центробежных машин. Сформулирована задача нахождения оптимальной частоты питающего напряжения для одного механизма и для группы механизмов собственных нужд ТЭС, которая обеспечивает максимальный КПД функционирования одного или группы агрегатов. Приводятся результаты для типичных последовательно-параллельных соединений механизмов в гидравлических сетях ТЭС.

Ключевые слова: тепловая электрическая станция, групповое управление, гидравлические системы, центробежные механизмы, частотно-регулируемый привод, энергоэффективность.

В. А. ВАНИН, М. М. КРУГОЛ, О. П. ЛАЗУРЕНКО

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ СИСТЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБОТИ КОТЛОАГРЕГАТА ТЕС В ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

В роботі розглядаються математичні моделі допоміжних механізмів ТЕС. Використовуючи табличні та графічні представлення аерогідродинамічних характеристик серійних вентиляторів та насосів, відтворені апроксимуючі їх математичні моделі квазистационарного функціонування за допомогою методу найменших квадратів та законів подоби для відцентрових машин. Сформульована задача знаходження оптимальної частоти живильної напруги для одного та групи механізмів власних потреб ТЕС, що забезпечує максимальний КПД функціонування одного або групи агрегатів. Приводяться результати для типових послідовно-паралельних з'єднань механізмів в гідравлічних мережах ТЕС.

Ключові слова: теплова електрична станція, групове керування, гідравлічні системи, відцентрові механізми, частотно-регульований привід, енергоефективність.

V. A. VANIN, M. M. KRUGOL, O. P. LASURENKO

MATHEMATICAL MODELS OF THERMAL POWER PLANT BOILER OPERATION SYSTEMS IN THE PROBLEM OF THE BOILER ENERGY EFFICIENCY IMPROVEMENT

The article deals with the analysis of thermal power plant's auxiliary mechanisms operational modes and construction of their optimal control over the supply voltage frequency. Tabular and graphical characteristics of the fans used in thermal power plants are analyzed. On the basis of the initial data, with application of the least squares method and similarity laws for centrifugal machines, models that describe the quasistationary mode of thermal power plants auxiliary mechanisms operation have been restored. The task to find the optimal frequency of the supply voltage for a single mechanism has been formulated. Besides, a group of mechanisms with similar operational modes has been identified and the task to find the optimal frequency of the supply voltage for this group in a specified mode has been set. The optimal frequency of the supply voltage ensures the mechanism group operation with the maximum average-weighted efficiency. Results for typical serial and parallel connections of the mechanisms in thermal power plant hydraulic network are given.

Key words: thermal power plant, group control, hydraulic systems, centrifugal mechanisms, variable frequency drive, energy efficiency.

Введение. В структуре установленной мощности объединенной энергосистемы Украины 62 % приходится на тепловые электрические станции (ТЭС). При этом выработка электроэнергии на них достигает уровня 40 %. Большинство ТЭС строились более 30 лет назад, и сейчас остро стоят вопросы реконструкции и модернизации основного и вспомогательного оборудования станций с целью повышения их надежности, энергоэффективности и маневренности. Одним из путей повышения энергоэффективного производства электрической энергии на ТЭС может стать уменьшение потерь электроэнергии в системах собственных нужд станций.

Система собственных нужд ТЭС – это комплекс вспомогательного оборудования электростанций, обеспечивающий бесперебойную работу ее основных агрегатов (паровых котлов, турбогенераторов). В большинстве своем это центробежные механизмы – насосы и вентиляторы. Единичная мощность таких агрегатов может достигать 6 МВт, а, следовательно, применение энергоэффективных способов управления ими может дать значительный экономический эффект за счет снижения потребления электроэнергии на собственные нужды.

Предлагаемые сегодня мероприятия по энергосбережению в системах собственных нужд дают значительный экономический эффект при сравнительно коротких сроках окупаемости, но имеют недостаток – необходимые большие капиталовложения, которые не всегда могут найти отечественные предприятия теплоэнергетики. Поэтому идет поиск путей повышения энергоэффективности работы ТЭС. Одним из таких способов может стать применение группового способа регулирования производительности механизмов собственных нужд ТЭС, исследуемый авторами [1, 2, 3].

В данной статье предложен метод нахождения оптимальной частоты питающего напряжения для выделенной группы механизмов собственных нужд ТЭС со схожим режимом работы.

Анализ последних исследований. Анализ режима работы агрегатов собственных нужд маневренных блоков ТЭС можно найти в работах Л. В. Проданова и В. Г. Агапова. В их работе [4] дается экономическое обоснование применения группового регулирования производительности механизмов СН ТЭЦ. Также возможность применения одного частного преобразователя для питания группы циркуляционных насосов ТЭС приводится в

работе Ванг Шупинг и Е Джунтао [5].

Другой подход к исследованию группового регулирования агрегатов собственных нужд представлен в работах В. Ф. Сивокобыленко [6], и Л. В. Проданова [7]. В них приводится анализ регулирования величины питающего напряжения для групп механизмов.

Большое количество работ посвящено исследованию индивидуального частотного привода, как основного внедряемого способа повышения энергоэффективности центробежных механизмов ТЭС. Анализ внедрения и описание экономического эффекта при внедрении индивидуального частотного привода можно найти в работе [8].

Постановка задачи. Основными механизмами собственных нужд ТЭС являются питательные насосы, циркуляционные насосы, сетевые насосы, дутьевые и мельничные вентиляторы, дымососы, насосы цеха химической очистки воды и другие. Данные агрегаты обеспечивают работу основного оборудования станции – котлов, турбин, общестанционных нужд. Существует множество схем включения данных агрегатов относительно основного оборудования, наиболее используемые из них указаны на рис. 1. Пример технологической схемы парового энергетического котла показан на рис. 2. На данной технологической схеме условно показаны механизмы собственных нужд, которые могут быть включены параллельно.

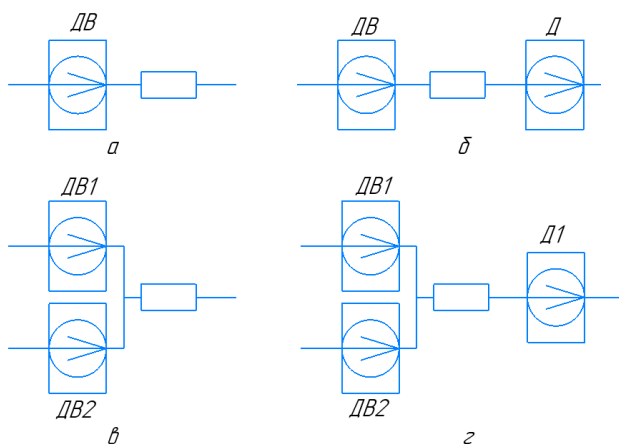


Рис. 1 – Схемы включения вспомогательного оборудования станции: а – работа на сеть; б – последовательное; в – параллельное соединение; г – смешанное соединение.

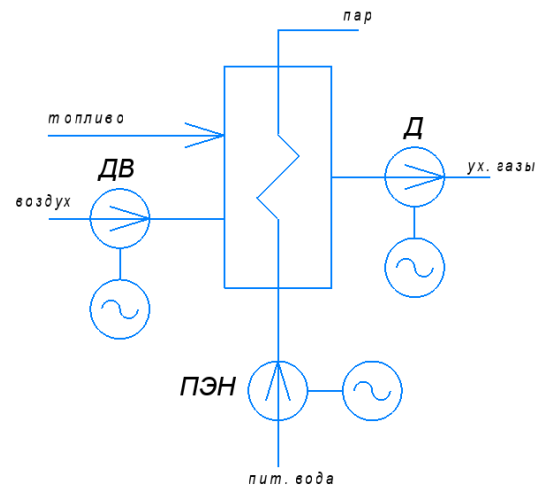


Рис. 2 – Вспомогательное оборудование котла.

Исходя из схем включения вспомогательных механизмов, можно сделать вывод, что их режимы работы взаимосвязаны, а характеристики имеют сходства, следовательно, весьма логичным есть объединение их в группы. Предполагается, что механизмы группы будут питаться от одного преобразователя частоты. Частота питающего напряжения будет находиться исходя из режима работы каждого из механизмов группы по критерию средневзвешенного КПД группы механизмов.

Математическая модель. Рассмотрим работу центробежного механизма на сеть (рис. 3). Система «центробежный механизм – сеть» состоит из двух компонентов – центробежного механизма (насос, вентилятор) и сети (трубопровод, газоход).

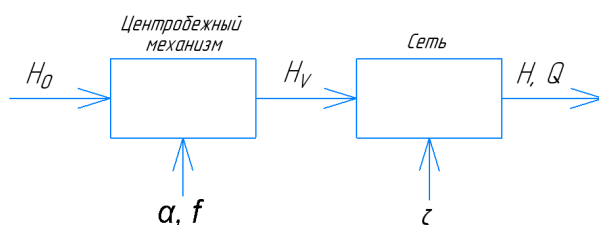


Рис. 3 – Структурная схема модели работы центробежного механизма на сеть.

Состояние центробежного механизма определяется следующими параметрами: напор, развиваемый центробежным механизмом – H , производительность агрегата – Q , скорость вращения рабочего колеса – n , угол открытия направляющего аппарата – α . Параметры, описывающие режим работы центробежного механизма, связаны соотношением:

$$F(\alpha, Q, n, H) = 0.$$

Из этого можно выразить напор, развиваемый центробежным механизмом, как функцию от его производительности, угла открытия направляющего аппарата и скорости вращения рабочего колеса в виде:

$$H = H(Q, \alpha, n). \quad (1)$$

Параметры, описывающие гидравлическую сеть, связаны следующим соотношением:

$$\Phi(Q, \xi, H_n).$$

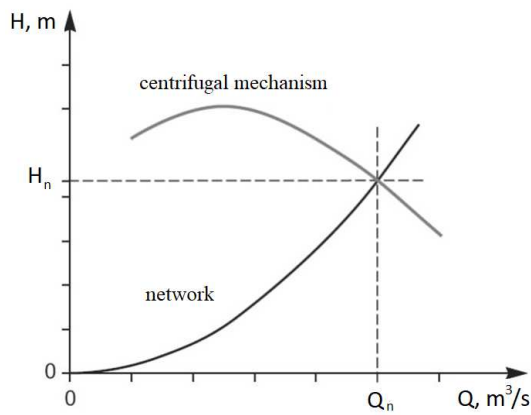


Рис. 4 – Совместная работа центробежного механизма на сеть.

Из (1) и (2) имеем, что согласованное функционирование системы «центробежный механизм – сеть» описывается следующим соотношением:

$$H(Q, \alpha, n) = H_n(Q, \xi).$$

Перепишем его в виде:

$$\Psi(\alpha, Q, n, \xi) = H(Q, \alpha, n) - H_n(Q, \xi) = 0. \quad (4)$$

Задав производительность, которую должен обеспечить центробежный механизм, $Q = Q_0$, и гидравлическое сопротивление сети $\xi = \xi_0$ из

$$\Psi(\alpha, Q_0, n, \xi_0) = 0.$$

найдем множество значений $D(\alpha, n)$, которые будут обеспечивать заданный расход при неизменном гидравлическом сопротивлении сети. Это множество описывается соотношением:

$$\alpha = \alpha(n, Q_0, \xi_0) = \alpha(n). \quad (5)$$

КПД центробежного механизма представим в виде:

$$\eta = \eta(Q, \alpha, n). \quad (6)$$

Необходимо найти оптимальное значение параметра (n) , который обеспечивает максимальное КПД функционирования системы. Для этого решается задача:

$$n^* = \arg \max_{n \in [n_{\min}, n_{\max}]} \eta(Q_0, \alpha(n), n). \quad (7)$$

Скорость вращения рабочего колеса механизма связана с частотой питающего напряжения через формулу:

$$n(f) = \frac{60 \cdot f}{p} (1 - s),$$

где f – частота питающего напряжения, Гц; p – количество пар полюсов; s – скольжение.

Следовательно, задачу (7) перепишем в виде

$$\begin{cases} f^* = \arg \max_{f \in [f_{\min}, f_{\max}]} \eta(Q_0, \alpha(n(f)), f); \\ D = \{ F(f) \in R : f \in [f_{\min}, f_{\max}] \}. \end{cases}$$

При питании группы механизмов собственных нужд ТЭС от одного частотного преобразователя критерием оптимальности будет средневзвешенный КПД группы механизмов. Введем его формулой:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{\sum P_i \eta_i(\alpha_i(f), Q_i, f)}{\sum P_i}, \quad i = 1 \dots N.$$

Тогда оптимальную частоту группы механизмов будем искать из решения следующей задачи:

$$\begin{cases} f_{\text{эп}}^* = \arg \max_{f_{\text{эп}} \in D_{\text{эп}}} \frac{\sum P_i \eta_i(\alpha_i(f_{\text{эп}}), Q_i, f_{\text{эп}})}{\sum P_i}; \\ D_i = \{ F_i(f_i) \in R : f_i \in [f_{i,\min}, f_{i,\max}] \}; \quad i = 1 \dots N. \\ D_{\text{эп}} \in \bigcap D_i, \end{cases} \quad (8)$$

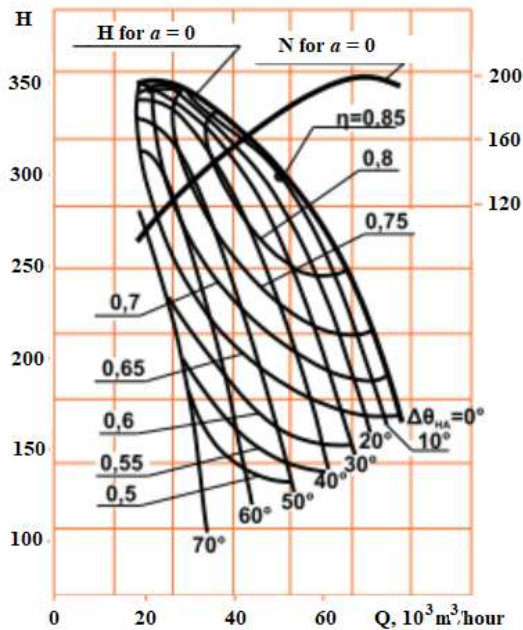


Рис. 5 – Паспортные характеристики дутьевого вентилятора ВДН-17-3.

Построение характеристик механизмов. Для дальнейшего анализа работы вспомогательных механизмов ТЭС необходимо получить зависимости (1) и (6) для каждого из них. Исходными данными будут паспортные характеристики центробежных механизмов в виде графиков зависимостей напоров и КПД механизмов от их производительностей и угла открытия направляющего аппарата. Пример паспортных характеристик для дутьевого вентилятора ВДН-17-3 показан на рис. 5.

По паспортным данным центробежного механизма снимем таблицы значений (a_i, Q_j, H_{ij}) и (a_i, Q_j, η_{ij}) , где $i = 1 \dots N$, $j = 1 \dots M$, для номинальной скорости вращения рабочего колеса механизма n_0 при частоте питающего напряжения $f = f_0$. Применяя метод наименьших квадратов [11] для скорости вращения рабочего колеса n_0 найдем коэффициенты h_i и восстановим выражение (1) в виде:

$$\tilde{H}(\alpha, Q, n(f_0)) = h_0 + h_1\alpha + h_2Q + h_3\alpha Q + h_4\alpha^2 + h_5Q^2, \quad (9)$$

где h_i , $i = 1, \dots, 5$ – коэффициенты, найденные по методу наименьших квадратов.

Согласно законам подобия центробежных механизмов имеют место соотношения [9]:

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0}, \quad (10)$$

$$\frac{\tilde{H}}{H_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2. \quad (11)$$

Исходя из соотношений (10), (11), зная значение напора и расхода при частоте питающего напряжения $f = f_0$, можно пересчитать, какие значения расхода и напора механизм будет развивать при другой частоте питающего напряжения:

$$Q = Q_0 \left(\frac{n(f_1)}{n(f_0)} \right), \quad (12)$$

$$\tilde{H} = H_0 \left(\frac{n(f_1)}{n(f_0)} \right)^2, \quad (13)$$

а, следовательно, выполняя математические преобразования выражений (9 – 13), можно восстановить (1) в виде:

$$\tilde{H}(\alpha, Q, f) = \left[h_0 + h_1\alpha + h_2Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) + h_3\alpha Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) + h_4\alpha^2 + h_5 \left[Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) \right]^2 \right] \left(\frac{n(f)}{n(f_0)} \right)^2. \quad (14)$$

Аналогичным образом восстановим функцию (6) для КПД при $f = f_0$:

$$\tilde{\eta}(\alpha, Q, n(f_0)) = k_0 + k_1\alpha + k_2Q + k_3\alpha Q + k_4\alpha^2 + k_5Q^2.$$

С учетом выражений (10) и (12) зависимость (6) восстановим в виде:

$$\tilde{\eta}(\alpha, Q, f) = k_0 + k_1\alpha + k_2Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) + k_3\alpha Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) + k_4\alpha^2 + k_5 \left[Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) \right]^2. \quad (15)$$

На рис. 6 и 7 показаны паспортные характеристики, построенные по выражениям (14) и (15).

Нахождение оптимальной частоты для вентилятора ВДН-17-3. Пускай вентилятор ВДН-17-3 работает на сеть с эквивалентным гидравлическим сопротивлением $\xi = \xi_0$. Найдем оптимальную частоту питающего напряжения f^* для случая, когда дутьевой вентилятор развивает производительность $Q = Q_0$.

С учетом (3) и (12) выражение (4) запишем в виде:

$$\left[h_0 + h_1\alpha + h_2Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) + h_3\alpha Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) + h_4\alpha^2 + h_5 \left[Q \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) \right]^2 \right] \left(\frac{n(f)}{n(f_0)} \right)^2 - \xi Q^2 = 0. \quad (16)$$

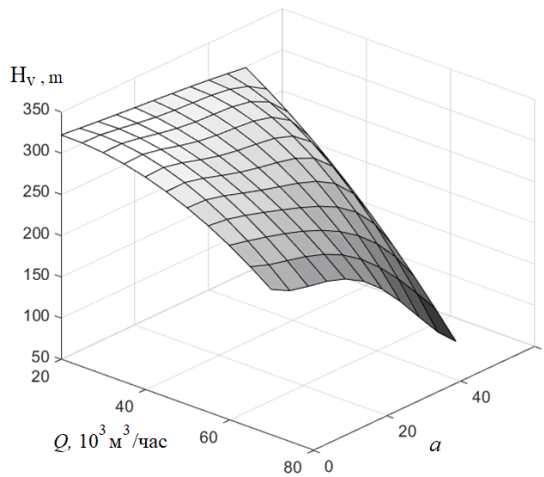


Рис 6 – Восстановленная характеристика напора для дутьевого вентилятора ВДН-17-3.

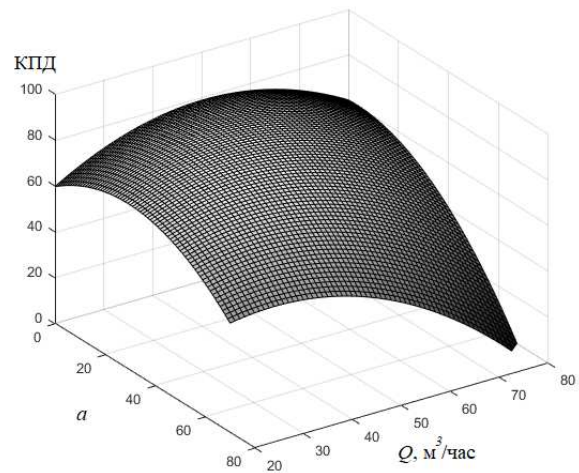


Рис 7 – Восстановленная характеристика КПД для дутьевого вентилятора ВДН-17-3.

Задав значения $\xi = \xi_0$ можно построить график функции $Q = Q(\alpha, f)$, которая соответствует уравнению (16). При задании режима работы центробежного механизма каким-то номинальным расходом $Q = Q_0$, можно построить в этой же системе координат плоскость $Q = Q_0$ (рис. 8). Линия пересечения плоскости $Q = Q_0$ с поверхностью $Q = Q(\alpha, f)$ в параметрическом виде запишется как

$$\begin{cases} \alpha = \alpha(f); \\ Q = Q_0. \end{cases} \quad (17)$$

Проекция ее на плоскость αOf в виде $\alpha = \alpha(f)$ показана на рис. 9. Данная функция показывает однозначную зависимость угла открытия направляющего аппарата центробежного механизма от частоты питающего напряжения.

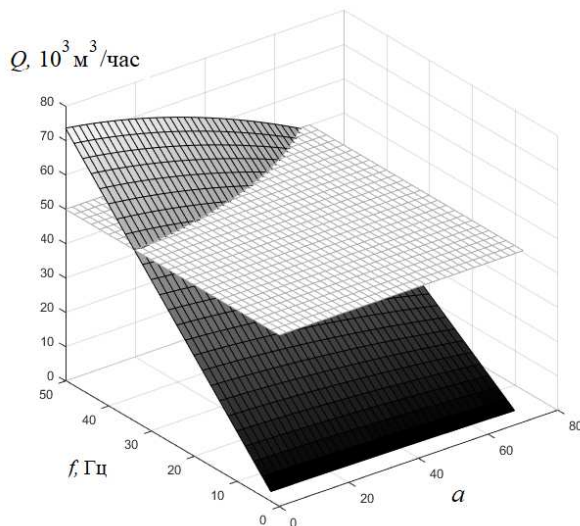


Рис. 8 – Пересечение поверхности $Q = Q(\alpha, f)$ с плоскостью $Q = Q_0$.

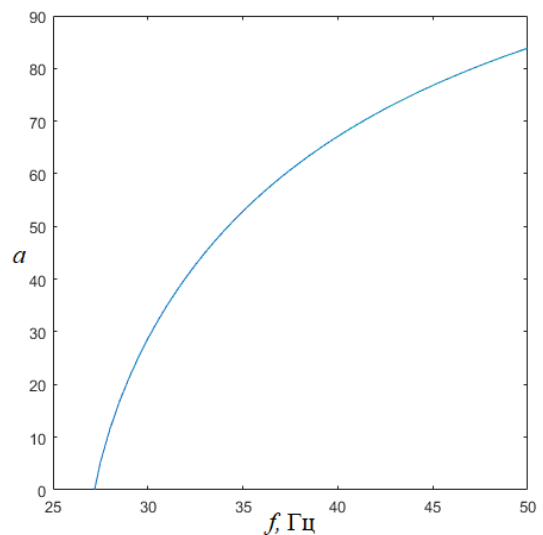


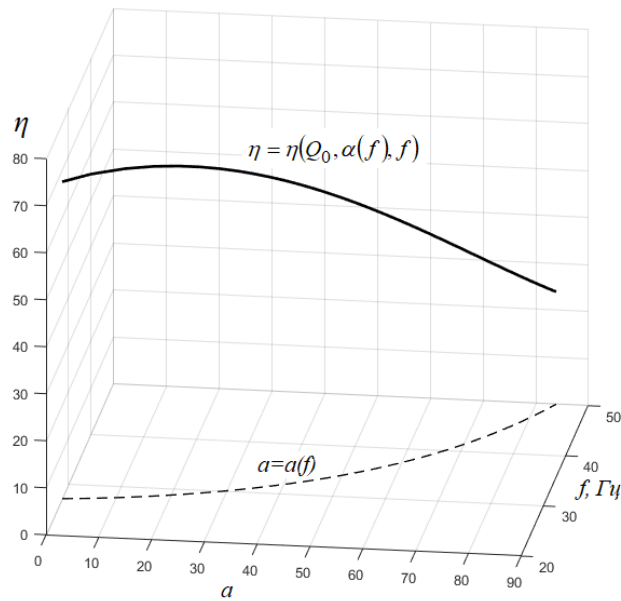
Рис. 9 – Зависимость угла открытия направляющего аппарата от частоты питающего напряжения.

Подставим значения $\alpha = \alpha(f)$ для режима работы центробежного механизма при $\xi = \xi_0$ и $Q = Q_0$ в выражение (15) и получим кривую КПД (рис. 10).

Найдем оптимальную частоту питающего напряжения, решив задачу

$$f^* = \arg \max_{f \in [f_{\min}, f_{\max}]} \left[k_0 + k_1 \alpha(f) + k_2 Q_0 \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) + h_3 \alpha(f) Q_0 \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) + k_4 [\alpha(f)]^2 + k_5 \left[Q_0 \cdot \left(\frac{n(f_0)}{n(f)} \right) \right]^2 \right] \quad (18)$$

поиска экстремума функции одной переменной (графическим или аналитическим способом).

Рис. 10 – КПД системы для режима работы при $\xi = \xi_0$ и $Q = Q_0$.

Нахождение оптимальной частоты для группы вспомогательных механизмов. Рассмотрим работу двух центробежных механизмов (дутьевой вентилятор и дымосос), каждый из которых работает на сеть с эквивалентным гидравлическим сопротивлением при $\xi = \xi_0$ и производительностью $Q = Q_0$. Решим задачи (16 – 18) и построим графики зависимости для КПД обоих механизмов (рис. 11).

Значения КПД механизмов определены в пределах области определения функции (5):

$$D = \left\{ F(f) \in R : f \in [f_{i,\min}, f_0] \right\}, \quad i = 1, 2.$$

При этом зоны определения функций для каждого из механизмов будут не одинаковыми, а следовательно, поиск оптимальной частоты питающего напряжения для группы механизмов будем находить в их общей части значений частот f_1 и f_2 :

$$\begin{cases} D_i = \left\{ F_i(f_i) \in R : f_i \in [f_{i,\min}, f_{i,\max}] \right\}; \\ D_{cp} \in \cap D_i, \end{cases} \quad i = 1, 2.$$

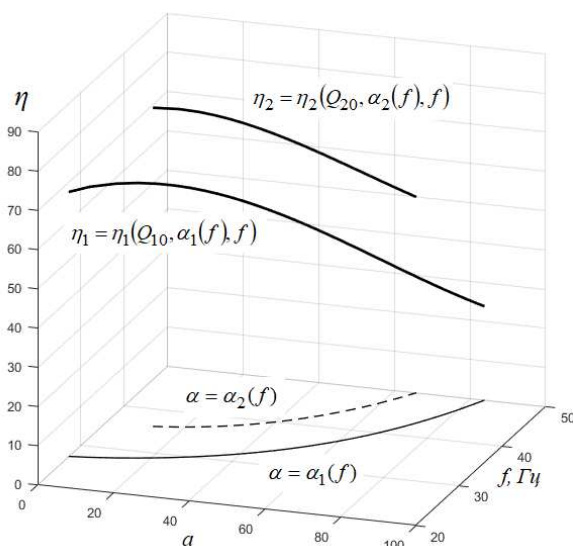


Рис. 11 – КПД механизмов.

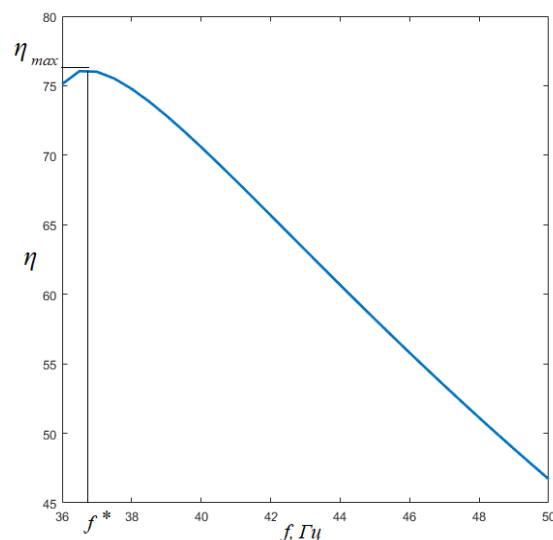


Рис. 12 – Средневзвешенный КПД группы механизмов.

Решим задачу (8) для группы вспомогательных механизмов

$$f^* = \arg \max_{f_{cp} \in D_{cp}} \frac{\sum P_i \eta_i(\alpha_i(f), Q_i, f)}{\sum P_i},$$

где коэффициенты – номинальные мощности электроприводов (либо рассчитаны по формуле [9]):

$$P = \frac{QH}{3600\eta}.$$

Средневзвешенный КПД, как функция от частоты питающего напряжения, показан на рис. 12.

Выводы. В статье рассмотрены математические модели центробежных механизмов ТЭС, построенные на основе метода наименьших квадратов и законов подобия для центробежных машин. Показаны наиболее часто встречаемые схемы соединения вспомогательных механизмов в технологических схемах ТЭС.

Разработана математическая модель функционирования системы «центробежный механизм – сеть». Для нее поставлена задача определения оптимальной частоты питающего напряжения, которая обеспечивает максимальный КПД на заданном режиме работы. Также было показано, что угол открытия направляющего аппарата при заданном режиме работы механизма и параметров сети, определяется частотой питающего напряжения.

Также поставлена задача нахождения оптимальной частоты питающего напряжения для группы механизмов собственных нужд, которые питаются от одного частотного преобразователя.

Приведены результаты математического моделирования.

Список литературы

1. Лазуренко А. П., Кругол Н. М. Использование группового регулирования механизмами собственных нужд ТЭС для повышения КПД в летний период // Вісник НТУ «ХПІ». Сер. : Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2014. – № 56(1098). – С. 78 – 82.
2. Ванін В. А., Кругол М. М., Лазуренко О. П. Оптимальне електромеханічне керування гідродинамічними системами // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. : Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. – 2018. – № 195. – С. 18 – 20.
3. Лазуренко А. П., Черкашина Г. И., Кругол Н. М. Повышение энергоэффективности работы ТЭС за счет снижения потребления электроэнергии на собственные нужды // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. – № 2. – С. 82 – 89.
4. Проданов Л. В., Агапов В. Г. Применение группового частотного регулирования для агрегатов собственных нужд маневренных блоков ТЭС // Енергетика. – 1990. – № 5. – С. 13 – 19.
5. Wang Shuping, Ye Jiantao, Li Wei, Du Xiaofeng, Chen Zinia. Energy efficiency evaluation investigation on high voltage inverter retrofit for fans and pumps in power plants (CIGRE Sessions 2012, Paris, France, August 26 – 31, 2012). – Режим доступу : https://cigreindia.org/CIGRE%20Lib/Cigre%20Pairis%202012/A1/A1_203_2012.pdf. – Дата звертання : 15 лютого 2019 р.
6. Сивокобыленко В. Ф., Павлюков В. А., Талал А. А. Информационно-вычислительная система минимизации расхода электроэнергии на собственные нужды электростанций // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : "Електротехніка і енергетика". – 2000. – № 21. – С. 44 – 47.
7. Проданов Л. В. Определение упрощенного критерия минимальных потерь при регулировании напряжения для заданных групп электродвигателей // Известия высших учебных заведений : Енергетика – 1974. – № 3. – С. 46 – 51.
8. Лазарев Г. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок // Силовая электроника. – 2007. – № 3. – С. 41 – 48.
9. Вахвахов Г. Г. Работа вентиляторов в сети. – М. : Стройиздат, 1975. – 101 с.
10. Рихтер Л. А. Газовоздушные тракты тепловых электростанций. – М. : Энергия, 1969. – 272 с.
11. Горяинов В. Б., Павлов И. В., Цветкова Г. М. Математическая статистика : Учеб. для вузов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 424 с.

References (transliterated)

1. Lazurenko A. P., Krugol N. M. Ispol'zovanie gruppovogo regulirovaniya mekhanizmami sobstvennykh nuzhd TEC dlya povysheniya KPD v letniy period [Using thermal power plant own need group regulation mechanism for improving efficiency during summer period]. *Visnik NTU «KhPI»*. Ser. : *Energetyka: nadiynist' ta energoeфекtyvnist'* [Bulletin of NTU "KhPI". Series : Energy: reliability and efficiency]. 2014, no. 56 (1098), pp. 78–82.
2. Vanin V. A., Krugol M. M., Lazurenko O. P. Optymal'ne elektromekhanichne keruvannya gidrodynamichnykh systemamy [Optimal electrical and mechanical control of hydrodynamic machines]. *Visnyk Kharkivsk'ogo natsional'nogo tekhnichnogo universytetu sil'sk'ogo gospodarstva imeni Petra Vasylenka*. Ser. : *Problemy energozabezpechennya ta energozberezhennya v APK Ukrainy* [Bulletin of the P. Vasilenko Kharkiv National Technical University of Agriculture. Series : Problems of power supply and energy saving in agro-industrial complex of Ukraine]. 2018, no. 195, pp. 18–20.
3. Lazurenko A. P., Cherkashina G. I., Krugol N. M. Povyshenie energoeфективности raboty TEC za schet snizheniya potrebleniya elektroenerгии na sobstvennyye nuzhdy [Improving thermal power plant efficiency by lowering auxiliary energy consumption]. *Energetyka : ekonomika, tekhnologiyi, ekologiya* [Energetic : economics, technology, ecology]. 2017, no. 2, pp. 82–89.
4. Prodanov L. V., Agapov V. G. Primenenie gruppovogo chastotnogo regulirovaniya dlya agregatov sobstvennykh nuzhd manevrennykh blokov TES [Using group frequency regulation for auxiliary aggregates of thermal power plant maneuverable units]. *Energetika* [Energetic]. 1990, no. 5, pp. 13–19.
5. Wang Shuping, Ye Jiantao, Li Wei, Du Xiaofeng, Chen Zinia. Energy efficiency evaluation investigation on high voltage inverter retrofit for fans and pumps in power plants (CIGRE Sessions 2012, Paris, France, August 26 – 31, 2012). Available at : https://cigreindia.org/CIGRE%20Lib/Cigre%20Pairis%202012/A1/A1_203_2012.pdf (accessed : 15.02.19).
6. Sivokobylenko V. F., Pavlyukov V. A., Talal A. A. Informatsionno-vychislitel'naya sistema minimizatsii raskhoda elektroenerгии na sobstvennyye nuzhdy elektrostantsiy [Information and computation system for minimizing power plant auxiliary consumption]. *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universytetu*. Seriya : *Elektrotekhnika i energetyka* [Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series : Electrical engineering and energetic]. 2000, no. 21, pp. 44–47.
7. Prodanov L. V. Opredelenie uproszhennogo kriteriya minimal'nykh poter' pri regulirovanii napryazheniya dlya zadannykh grupp elektrodvigatelye [Determining simplified criterion of voltage regulation for given groups of electric motors]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy : Energetika* [Bulletin of Higher Educational Institutions : Energetic]. 1974, no. 3, pp. 46–51.
8. Lazarev G. Chastotno-reguliruemyy elektroprivod nasosnykh i ventilyatornykh ustanovok [Variable frequency electric drive of pump and ventilator machines]. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. 2007, no. 3, pp. 41–48.
9. Vakhvakhov G. G. *Rabota ventilyatorov v seti* [Fan operation in network]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975. 101 p.
10. Rikhter L. A. *Gazovozdushnye trakty teplovykh elektrostantsiy* [Gas-air tracts of thermal power stations]. Moscow, Energiya Publ., 1969. 272 p.
11. Goryainov V. B., Pavlov G. M., Tsvetkova G. M. *Matematicheskaya statistika : Ucheb. dlya vuzov* [Mathematical statistics : textbook]. Moscow,

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Ванін Віктор Антонович (Ванин Виктор Антонович, Vanin Viktor Antonovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) 707-60-35; e-mail: plbvva5652xpi@gmail.com.

Кругол Микола Михайлович (Кругол Николай Михайлович, Kruhoh Mykola Mykhaylovych) – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) 707-66-00; e-mail: kruhgol@gmail.com.

Лазуренко Олександр Павлович (Лазуренко Александр Павлович, Lasurenko Oleksandr Pavlovych) – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) 707-66-00; e-mail: lazurenkoAP@i.ua.

УДК 519.6

В. А. ВАНИН, С. П. СВЕТЛИЧНЫЙ**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ МЯГКОГО ТЕЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДА SPH**

Рассмотрен пример совместного применения программных продуктов ANSYS и LS-DYNA для создания численной модели мягкого тела в случае использования бессеточного метода сглаженных частиц SPH. Используя возможности встроенного в систему ANSYS языка программирования ANSYS Parametric Design Language, реализован алгоритм автоматизированного построения численной модели мягкого тела заданной массы и размеров, которая применяется для численного моделирования фронтального и косого удара.

Ключевые слова: мягкое тело, косой удар, ANSYS Parametric Design Language, бессеточный метод сглаженных частиц, система координат, рабочая плоскость.

В. А. ВАНІН, С. П. СВІТЛИЧНИЙ**ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ПАРАМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЧИСЕЛЬНОЇ МОДЕЛІ М'ЯКОГО ТІЛА НА ОСНОВІ МЕТОДУ SPH**

Розглянуто приклад спільного застосування програмних продуктів ANSYS і LS-DYNA для створення чисельної моделі м'якого тіла у разі використання безсіткового методу згладжених частинок SPH. Використовуючи можливості вбудованої в систему ANSYS мови програмування ANSYS Parametric Design Language, реалізовано алгоритм автоматизованої побудови чисельної моделі м'якого тіла заданої маси і розмірів, яка застосовується для чисельного моделювання фронтального і косого удару.

Ключові слова: м'яке тіло, косий удар, ANSYS Parametric Design Language, безсітковий метод згладжених частинок, система координат, робоча площина.

V. A. VANIN, S. P. SVETLICHNYI**APPLICATION OF PARAMETRIC MODELING TOOLS FOR CREATION OF NUMERICAL MODEL OF A SOFT BODY USING SPH METHOD**

An example of combined application of ANSYS and LS-DYNA software for creation of numerical model of soft body using meshless smoothed particle hydrodynamics method (SPH) is discussed in the paper. The experience of practical application of the LS-DYNA multipurpose program for solving the problem of numerical simulation of soft body-to-aircraft engine blade contact interaction showed that in the case of using the meshless method of smoothed particles for soft body discretization the process of building a numerical model is not sufficiently automated. A macro containing a set of APDL commands, which allows to create automatically a numerical model of a soft body that contains a set of SPH particles evenly distributed within the volume of a given shape, was developed. The macro allows to determine the dimensions of the soft body of a given density and mass, to define its spatial orientation with respect to the target, as well as to control the distance between SPH particles. Automation of numerical model creation significantly simplifies the process of parametric numerical analysis and reduces the time of model development.

Key words: soft body, oblique impact, ANSYS Parametric Design Language, smoothed-particle hydrodynamics method, coordinate system, working plane.

Введение. В процессе проектирования новых птицестойких лопаток авиационных двигателей, способных выдерживать удар птицы заданной массы без разрушения или повреждений, которые могут существенно сказаться на работоспособности двигателя, необходимо проводить большой объем численных исследований. Применение средств автоматизации при выполнении расчетов позволяет сократить сроки разработки и повысить эффективность процесса численных исследований. В настоящее время в инженерной практике и при проведении научных исследований применяются различные программные комплексы, такие как LS-DYNA, ANSYS, MSC-DYTRAN, Altair Hyper Mesh и др., в которых реализованы различной степени сложности математические модели и численные методы решения. Опыт практического использования многоцелевой программы LS-DYNA для решения задачи численного моделирования контактного взаимодействия мягкого тела с лопаткой авиацион-